

## Моделирование клеевых соединений для обеспечения надежности трехмерных микроэлектронных модулей

*А.И. Погалов, Г.А. Блинов, Е.Ю. Чугунов*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
г. Москва, Россия*

*dtm@miee.ru*

Для обеспечения работоспособности, долговечности и надежности микроэлектронных модулей в трехмерном исполнении необходим инженерный расчет конструкций, включающий моделирование клеевых соединений, обоснованный выбор материалов и конструктивных решений.

Изложены основные тактико-технические требования к трехмерным микроэлектронным модулям и преимущества применения клеевых материалов в конструкциях модулей. Установлено, что прочность конструкций трехмерных микроэлектронных модулей и эксплуатационные характеристики клеевых соединений зависят от многих факторов. Наиболее значимые из них: свойства клеевого материала, конструкция соединений, условия эксплуатации. Рассмотрены виды нагрузок, которые испытывают модули в процессе эксплуатации, и их влияние на прочность конструкций. Показано, что неравномерные нагрузки, такие как отдир и изгиб, являются наиболее опасными видами нагружения для клеевых соединений модулей. Установлено, что при отдире возникает высокая концентрация краевых напряжений, приводящая к разрушению соединений, а при изгибе отмечается концентрация нормальных и касательных напряжений по длине клеевых швов. Выполнен анализ клеевых материалов, применяемых для сборки модулей. Осуществлен выбор клеевых материалов с учетом основных конструктивно-технологических ограничений и требований к клеевым соединениям. Проведено моделирование конструкций модулей и определено влияние физико-механических и теплофизических свойств клеевых материалов на напряжения в клеевых соединениях и прочность изделий при воздействии инерционных нагрузок с ускорением 1000 g и нагреве на 40 °С. Даны рекомендации по моделированию клеевых соединений трехмерных микроэлектронных модулей.

Полученные результаты показали, что напряжения зависят от упругих свойств клеевых соединений, характера и величины воздействия на них и определяются механической прочностью и жесткостью клеевого материала. Для снижения напряжений необходимо использовать более жесткие конструкционные материалы, а клеевые материалы выбирать исходя из условий эксплуатации микроэлектронных модулей.

*Ключевые слова:* трехмерный микроэлектронный модуль; клеевые соединения; прочность многослойных клеевых конструкций; напряженно-деформированное состояние материалов; метод конечных элементов.

*Для цитирования:* Погалов А.И., Блинов Г.А., Чугунов Е.Ю. Моделирование клеевых соединений для обеспечения надежности трехмерных микроэлектронных модулей // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 1. – С. 23–31. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-1-23-31

## **Modeling of Adhesive-Bonded Joints to Ensure Reliability of Three-Dimensional Microelectronic Modules**

*A.I. Pogalov, G.A. Blinov, E.Y. Chugunov*

*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

*dtm@miee.ru*

To ensure the efficiency, durability and reliability of three-dimensional microelectronic modules the engineering calculation of structures, including modeling of the adhesive-bonded joints, the stipulated choice of materials and design solutions, is necessary.

The basic tactical and technical requirements for three-dimensional microelectronic modules and the advantages of the application of adhesive materials in the modules designs have been presented. It has been determined that the strength of the structures of three-dimensional microelectronic modules and the performance characteristics of the adhesive-bonded joints depend on many factors. The most important ones are the properties of the adhesive-bonded material, the construction of joints and the operating conditions. The types of loads affecting the modules in the operation process and their effect upon the structures have been considered. It has been shown that the non-uniform loads, such as peeling and bending, are the most dangerous types of loading for adhesive-bonded joints of the modules. It has been determined that when peeling, a high concentration of the edge stresses arises, leading to the destruction of compounds, and when bending, the concentration of normal and tangential stresses along the length of the adhesive-bonded joints is noted. The analysis of the assortment of adhesive materials, applicable for assembly of the modules has been executed. The choice of adhesive materials has been made with taking into account the main design and technological limitations and the requirements for the adhesive-bonded joints. The modeling of the module designs has been performed and the effect of physical, mechanical and thermal properties of the adhesive-bonded joints and the strength of products when subjected to the inertial loads with an acceleration of 100 g and heated to 40 °C has been determined. It has been stated that the stress values depend on the elastic properties of the adhesive-bonded joints, the nature and value of the effect upon them and are determined by mechanical strength and rigidity of the adhesive material. The recommendations on the design of the adhesive-bonded joints of three-dimensional microelectronic modules have been given.

The obtained results have shown that the stresses depend on elastic properties of the adhesive-bonded joints, the nature and value of the effect upon them, and are determined by mechanical strength and rigidity of the adhesive material. To reduce the stresses it is necessary to use more rigid construction materials, and the adhesive-bonded materials must be chosen based on the conditions of the microelectronic module operation.

*Keywords:* three-dimensional microelectronic module; adhesive-bonded joints; strength of multilayered adhesive structures; stress-strain state of materials; finite-element method.

*For citation:* Pogalov A.I., Blinov G.A., Chugunov E.Y. Modeling of adhesive-bonded joints to ensure reliability of three-dimensional microelectronic modules // Proc. of Universities. Electronics. – 2018. – Vol. 23. – № 1. – P. 23–31. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-1-23-31

**Введение.** Основными тактико-техническими требованиями к трехмерным микроэлектронным модулям с высокой степенью интеграции являются уменьшение массогабаритных характеристик, повышение функциональной сложности и надежности, снижение трудоемкости изготовления изделий. Указанные требования обуславливают применение клеевых материалов, обеспечивающих возможность надежного соединения разнородных материалов в многослойных конструкциях микроэлектронных модулей в трехмерном исполнении [1–4].

С помощью клеевых материалов (герметиков, клеев и компаундов) между соединяемыми частями конструкции модулей формируются клеевые швы, которые образуют клеевые соединения (КС) сопрягаемых поверхностей. Такие КС имеют следующие преимущества, обусловленные уникальным сочетанием физико-механических и теплофизических свойств клеевых материалов:

- высокая прочность клеевых швов при склеивании однородных и разнородных материалов в различных сочетаниях;
- простота и дешевизна технологии склейки с возможностью автоматизации технологических процессов;
- высокая стойкость к коррозии, хорошие диэлектрические свойства, герметичность соединений;
- устойчивость к динамическим воздействиям и циклическим переменным механическим напряжениям.

Однако эксплуатационные характеристики КС зависят главным образом от таких факторов, как свойства клеевого материала, конструкция соединений, условия эксплуатации [5].

**Моделирование и методы расчета КС.** В процессе эксплуатации трехмерные микроэлектронные модули подвергаются различным нагрузкам, оказывающим влияние на прочность конструкций. КС испытывают следующие виды нагрузок: сдвиг, отрыв, отдир и изгиб (рис.1). При сдвиге центральной силой распределение напряжений по длине клеевых швов осуществляется равномерно, что обеспечивает наибольшую стойкость от разрушения КС. Несущая способность соединений, нагруженных на равномерный отрыв, так же высока. Для предотвращения возникновения дополнительных изгибающих деформаций и нагрузок соединяемые части конструкции модулей должны быть достаточно жесткими. Неравномерные нагрузки, такие как отдир и изгиб, наиболее опасны, так как при отдире возникает высокая концентрация краевых напряжений, приводящая к разрушению соединений, а при изгибе отмечается концентрация нормальных и касательных напряжений по длине клеевых швов. Вследствие этого в конструкциях трехмерных микроэлектронных модулей для формирования КС, работающих на отдир и изгиб, следует избегать применения неэластичных, жестких клеевых материалов, а также податливых конструкционных материалов.

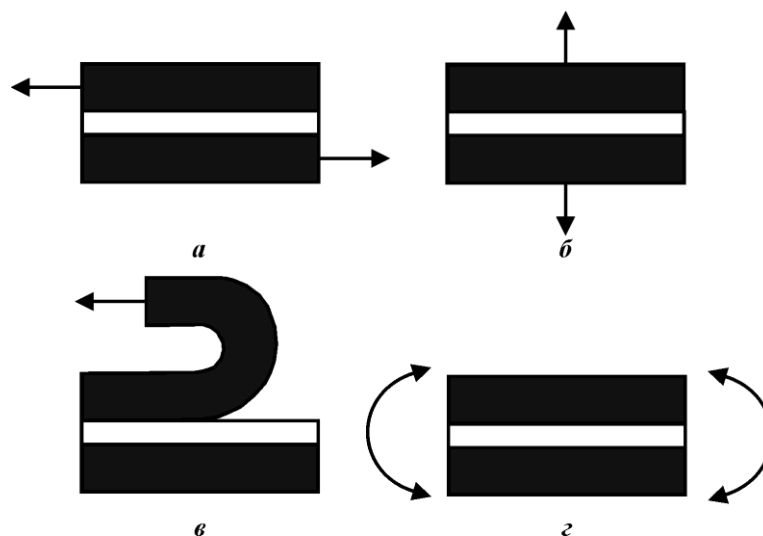


Рис. 1. Виды нагрузок в КС: а – сдвиг; б – отрыв; в – отдир; г – изгиб  
 Fig.1. Types of loads acting in adhesive-bonded joints: a – shift;  
 b – detachment; c – peeling; d – bending

Одна из основных задач при разработке конструкций трехмерных микросистемных модулей – обеспечение прочностной надежности материалов в условиях различных механических и климатических воздействий. Высокая степень интеграции и плотность компоновки изделий могут приводить к возникновению на границах КС повышенных термомеханических напряжений и последующему разрушению многослойных конструкций вследствие различия соединяемых и клеевых материалов по физико-механическим и другим свойствам. Недостаточная точность расчета прочности материалов конструкций с концентраторами напряжений, возникающих при проявлении внешних механических и климатических воздействий, технологических и эксплуатационных дефектов, может являться причиной разрушения КС.

Оценка конструктивно-технологических ограничений микросистемных модулей в трехмерном исполнении показала, что прочность клеевых конструкций имеет значительный разброс и зависит как от геометрии клеевых швов, так и от величины и характера нагрузок при эксплуатации. Основные параметры при моделировании КС:

- виды и величины действующих на КС нагрузок;
- совместимость соединяемых и клеевых материалов по физико-механическим и химическим свойствам с учетом коэффициентов температурного расширения;
- высокая технологичность клеевых материалов и возможность склеивания с минимальным числом соединений;
- возможность сопряжения соединяемых и клеевых материалов по всей площади соединения с обеспечением толщины клеевых швов в диапазоне 0,05–0,2 мм;
- обеспечение коэффициента запаса прочности КС в пределах от 1,5 до 2,5.

Расчет и анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) материалов многослойных конструкций в работах [3, 6, 7] показали, что напряжения в сложных композиционных конструкциях распределяются неравномерно. В клеевых швах возникает концентрация напряжений, что приводит к разрушению КС в случае превышения максимально допустимых напряжений и запаса прочности клеевых материалов. Поэтому при моделировании КС трехмерных микросистемных модулей необходимо иметь объективную информацию о прочности конструкций, которая может быть получена в результате инженерного расчета и определения НДС материалов.

Эффективным и наиболее производительным способом расчета НДС многослойных конструкций является численный метод конечных элементов, реализованный в вычислительных программных комплексах и используемый в проводимых исследованиях. Метод позволяет с высокой точностью определять значения напряжений в любых точках конструкций с учетом свойств и формы конструкционных материалов, особенностей соединений, например сужение основного или неравномерное распределение клеевого материалов [8, 9]. Для проверки конечно-элементных моделей, полученных в вычислительных программных комплексах, используют аналитический метод расчета НДС. При этом алгоритмы численного и аналитического методов расчета включают блоки физико-механических и теплофизических свойств используемых конструкционных материалов, а точность и сопоставимость получаемых результатов зависят от достоверности исходных данных и степени соответствия моделей реальному изделию.

**Выбор и свойства материалов КС.** От правильного выбора клеевого материала зависят работоспособность, долговечность, надежность КС и, как следствие, прочность конструкций модулей.

При сборке микроэлектронных модулей в трехмерном исполнении чаще всего применяют клеевые материалы на основе эпоксидных, полиуретановых, полиимидных, кремнийорганических смол и их сочетаний, включая комбинации с другими синтетическими полимерными композициями. Эпоксидные, полиуретановые и полиимидные клеевые материалы, как правило, имеют хорошие диэлектрические и адгезионные свойства, а также высокие механическую прочность и жесткость ( $E > 100$  МПа). Кремнийорганические клеи имеют высокие диэлектрические характеристики и эластичность ( $E = 1 \dots 10$  МПа).

В настоящей работе выбор клеевых материалов для конструкций модулей осуществлялся с учетом следующих основных требований: высокая механическая прочность и совместимость клеевых материалов с соединяемыми материалами; высокая теплопроводность и адгезионная способность в рабочем интервале температур эксплуатации от  $-60$  до  $+125$  °С; удельное объемное сопротивление более  $10^{14}$  Ом·см; тангенс угла потерь  $\text{tg}\delta < 10^{-3}$  на частоте 100 МГц; диэлектрическая проницаемость  $\epsilon < 3,5$ . Физико-механические и теплофизические свойства используемых клеевых, а также соединяемых материалов приведены в табл.1 [1, 6, 10, 11].

Таблица 1

**Физико-механические и теплофизические свойства материалов для КС**

Table 1

**Physical, mechanical and thermophysical properties of the adhesive materials used**

Материал	Модуль упругости $E$ , МПа	ТКЛР $\alpha \cdot 10^6$ , °С <sup>-1</sup>	Допускаемые напряжения $[\sigma]$ , МПа	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/(м·К)	Относительное удлинение при разрыве $\delta$ , %
<b>Клеевые материалы</b>					
ВК-9	5000	72	30	0,8	1
ПО 1-40	3000	20	150	0,3	20
Эластосил 137-182	2	230	3	1,8	220
DM 4140	1,2	25	2	2,4	–
<b>Соединяемые материалы</b>					
Сплав АМг	$7 \cdot 10^4$	24	200	180	40
Кремний	$1,3 \cdot 10^5$	4,2	200	100	–
Полиимид	$3 \cdot 10^3$	20	175	0,3	40–70

Эпоксидно-полиамидный клей ВК-9 на основе эпоксидной смолы ЭД-20 применяется для высокопрочного соединения жестких материалов или навесных элементов площадью до 3 мм<sup>2</sup>. Полиимидный клей марки ПО 1-40 характеризуется высокими механическими свойствами и хорошей совместимостью с используемыми в модулях материалами. Кремнийорганический теплопроводный клей Эластосил 137-182 имеет повышенную теплопроводность по сравнению с другими марками клеев, высокую адгезию и эластичность. Кремнийорганический клей-герметик марки DM 4140 на основе термопластичного полимера с керамическим наполнителем характеризуется высокими диэлектрическими и теплопроводными свойствами, обеспечивает хорошую ремонтпригодность КС.

**Моделирование КС трехмерных микрoeлектронных модулей.** С целью разработки конструктивно-технологических ограничений на многослойные клеевые конструкции и обоснованного выбора материалов

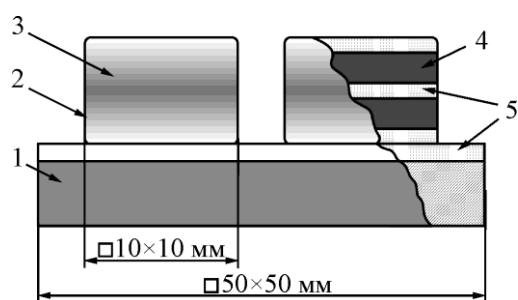


Рис.2. Расчетная схема конструкции трехмерного микрoeлектронного модуля: 1 – основание из АМг сплава; 2 – многокристалльная микросборка; 3 – полиимидная коммутационная плата; 4 – кремниевый кристалл; 5 – клеевой материал

Fig.2. Model of structure of three-dimensional microelectronic module: 1 – base alloy AlMg; 2 – multichip microassembly; 3 – polyimide interconnection board; 4 – silicon crystal; 5 – adhesive material

для КС проведены моделирование, расчет и анализ НДС конструкций модулей, подвергнутых воздействию инерционных нагрузок с ускорением 1000 g и нагреву на 40 °С. Для этого разработаны пять вариантов модели трехмерного модуля с конечно-элементной дискретизацией, различающихся марками используемых клеевых материалов. Расчетная схема исследуемой конструкции модуля показана на рис.2. Модуль содержит жестко закрепленное основание толщиной 500 мкм из алюминий-магниевого (АМг) сплава размером 50 × 50 мм в плане, на котором симметрично размещены четыре микросборки размером 10 × 10 мм в плане. Каждая микросборка включает коммутационную плату из полиимидной пленки толщиной 50 мкм и несколько кремниевых кристаллов толщиной 300 мкм, установленных один над другим. Соединение частей модуля проводится одним из выбранных клеевых материалов, за исключением базового варианта 1, в котором выполнены жесткие неразъемные соединения частей непосредственно друг к другу. Толщина клеевых швов составляет 50 мкм. Полученные в результате моделирования и расчета значения температурных  $\sigma_T$  и механических  $\sigma_M$  эквивалентных напряжений в материалах модуля представлены в табл.2.

Соединение частей модуля проводится одним из выбранных клеевых материалов, за исключением базового варианта 1, в котором выполнены жесткие неразъемные соединения частей непосредственно друг к другу. Толщина клеевых швов составляет 50 мкм. Полученные в результате моделирования и расчета значения температурных  $\sigma_T$  и механических  $\sigma_M$  эквивалентных напряжений в материалах модуля представлены в табл.2.

Таблица 2

Эквивалентные напряжения в материалах модуля, МПа

Table 2

Equivalent stresses in the module materials

Материал	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4		Вариант 5	
	$\sigma_T$	$\sigma_M$	$\sigma_T$	$\sigma_M$	$\sigma_T$	$\sigma_M$	$\sigma_T$	$\sigma_M$	$\sigma_T$	$\sigma_M$
Клей	–	–	20	0,9	3,4	1,5	0,2	0,9	0,1	0,64
Сплав АМг	52	22	46	21	48	21,3	38	43	39	44
Кремний	52,6	22,4	53	20,5	48	20,7	2,2	52	1,4	52
Полиимид	3,5	0,6	3,3	0,6	3,5	1,6	2,6	1,5	2,4	1,4

Проведенные исследования показали, что напряжения в многослойной конструкции модуля зависят от упругих свойств КС, характера и степени температурных и механических воздействий на них и определяются прочностью и жесткостью клеевого материала. Так, жесткое неразъемное соединение частей модуля непосредственно друг к другу в базовом варианте 1 не обеспечивает возможности демпфирования и перераспределения нагрузок между материалами модуля. Это приводит к максимальной концентрации эквивалентных температурных напряжений во всех материалах. При этом жесткое соединение обеспечивает высокую прочность конструкции при механических воздействиях. Однако при неравномерных нагрузках на границах КС возникают высокие поперечные напряжения, что может приводить к локальному расслоению материалов. Подобный характер распределения напряжений наблюдается при использовании жестких клеев марок ВК-9 и ПО 1-40 (варианты 2 и 3 соответственно). В случае применения клея ВК-9 напряжения в кремнии достигают максимальных значений (до 53 МПа). Однако введение клеевого материала позволяет перераспределить напряжения в конструкции при температурных воздействиях. Так, нагрев на 40 °С сопровождается ростом напряжений в клее до 20 МПа, что обеспечивает снижение напряжений в основании из сплава АМг и полиимиде до 46 и 3,3 МПа соответственно. При использовании менее жесткого клея ПО 1-40 напряжения в конструкции распределяются более равномерно. Наблюдается рост напряжений в податливых материалах и снижение максимальных напряжений до 48 МПа.

Применение эластичных клеев марок Эластосил 137-182 и DM 4140 (варианты 4 и 5 соответственно) приводит к существенному изменению характера распределения напряжений. Такие материалы перераспределяют нагрузки в клеевых швах от центра к краям. При температурных воздействиях наблюдается значительное снижение максимальных напряжений в материалах модуля (до 38–39 МПа). Напряжения в клеевых материалах не превышают 0,2 и 0,1 МПа (варианты 4 и 5 соответственно). Однако при воздействии инерционных нагрузок меньшая жесткость поперечных связей эластичных КС приводит к существенному росту напряжений в жестких конструкционных материалах (в кремнии до 52 МПа, в основании из сплава АМг до 43–44 МПа) и повышению нагрузок на краях клеевых швов, что может приводить к появлению пластических деформаций и локальному расслоению КС.

Эпюры распределения максимальных эквивалентных напряжений по площади КС имеет вогнутую форму с минимальными значениями в центре и с максимальными по краям соединений. Вследствие этого прочностные характеристики КС в поперечном направлении значительно уступают характеристикам в продольном направлении.

**Заключение.** Исследование многослойных клеевых конструкций микроэлектронных модулей показало, что напряжения зависят от упругих свойств КС, характера и степени воздействия на них и определяются механической прочностью и жесткостью клеевого материала. Неравномерные нагрузки, такие как отдир и изгиб, наиболее опасны для КС модулей. Для снижения напряжений в КС необходимо использовать более жесткие конструкционные материалы с близкими характеристиками прочности и несущей способностью, а клеевые материалы выбирать исходя из условий эксплуатации модулей, степени температурных и механических воздействий.

Влияние температурных воздействий компенсируется применением эластичных, податливых клеевых материалов, таких как клеи марок Эластосил 137-182 и DM 4140. При эксплуатации модулей в условиях высоких механических нагрузок целесообразно применять клеи с повышенными характеристиками поперечной жесткости, например клеи марок ВК-9 и ПО 1-40.

## Литература

1. Гуськов Г.Я., Блинов Г.А., Газаров А.А. Монтаж микросхемной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1986. – 176 с.
2. Грушевский А.М. Сборка и монтаж многокристальных микромодулей: учеб. пособие / Под ред. Л.А.Коледова. – М.: МИЭТ, 2003. – 196 с.
3. Погалов А.И., Блинов Г.А., Чугунов Е.Ю. Напряженно-деформированное состояние и тепловой режим многослойных клеевых соединений многокристальных микромодулей // Конструкции из композиционных материалов. – 2013. – № 2. – С. 18–22.
4. Development of high throughput adhesive bonding scheme by wafer-level underfill for 3D die-to-interposer stacking with 30µm-pitch micro interconnections / Y. Huang, C. Fan, Y. Lin et al. // IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference. – 2015. – P. 490–495.
5. Вильнав Ж.-Ж. Клеевые соединения. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
6. Кузнецов О.А., Погалов А.И., Сергеев В.С. Прочность элементов микросхемной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1990. – 144 с.
7. Погалов А.И., Блинов Г.А., Чугунов Е.Ю. Конструктивная прочность и тепловой режим многокристальных модулей // Изв. вузов. Электроника. – 2017. – Т. 22. – № 1. – С. 50–56.
8. Codecasa L., d'Alessandro V., Magnani A., Rinaldi N. Fast nonlinear dynamic compact thermal modeling with multiple heat sources in ultra-thin chip stacking technology // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 7. – Iss.1. – P. 58–69.
9. Gupta S., Shukla D., Bharti A. Effect of alumina nanoparticles on shear strength of epoxy adhesive: experimental and finite element analysis // International Conference on Advances in Mechanical, Industrial, Automation and Management Systems. – 2017. – P. 307–313.
10. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учеб. для вузов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 592 с.
11. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т. Т.3. / Под ред. И.И. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2006. – 928 с.

Поступила 30.06.2017 г.; принята к публикации 09.11.2017 г.

**Поголов Анатолий Иванович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической механики Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), dtm@miee.ru

**Блинов Геннадий Андреевич** – доктор технических наук, профессор кафедры микросхемной аппаратуры Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

**Чугунов Евгений Юрьевич** – аспирант кафедры микросхемной аппаратуры Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), Chugunov-EU@inbox.ru

## References

1. Gus'kov G.Ya., Blinov G.A., Gazarov A.A. *Montazh mikroelektronnoj apparatury* [Mounting of Microelectronic Devices]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1986. 176 p. (In Russian).
2. Grushevskij A.M. *Sborka i montazh mnogokristal'nyh mikromodulej. Uch. posobie. Pod red. L.A.Koledova* [Assembly and Mounting of Multichip Micromodules]. Moscow, MIET Publ., 2003. 196 p. (In Russian).
3. Pogalov A.I., Blinov G.A., Chugunov E.Yu. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie i teplovoj rezhim mnogoslojnyh kleevyh soedinenij mnogokristal'nyh mikromodulej [Stress-Strain State and Thermal Burdening of Multilayered Adhesive Bonding Multichip Micromodules]. *Konstrukcii iz kompozicionnyh materialov*, 2013, no. 2, pp. 18–22. (In Russian).
4. Huang Y., Fan C., Lin Y et al. Development of high throughput adhesive bonding scheme by wafer-level underfill for 3D die-to-interposer stacking with 30µm-pitch micro interconnections. *IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference*, 2015, pp. 490–495.

5. Vil'nav Zh.-Zh. *Kleevye soedineniya* [Adhesive Bonding]. Moscow, Tekhnosfera Publ. 2007. 384 p. (In Russian).
6. Kuznecov O.A., Pogalov A.I., Sergeev V.S. *Prochnost' elementov mikroelektronnoj apparatury* [Strength of Elements of Microelectronic Devices]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1990. 144 p. (In Russian).
7. Pogalov A. I., Blinov G.A., Chugunov E.Yu. Konstruktivnaya prochnost' i teplovoj rezhim mnogokristal'nyh modulej [Structural Strength and Thermal Behavior of Multichip Modules]. *Izvestiya vuzov. Elektronika – Proceedings of Universities. Electronics*, 2017, vol. 22, no. 1, pp. 50–56. (In Russian).
8. Codecasa L., d'Alessandro V., Magnani A., Rinaldi N. Fast nonlinear dynamic compact thermal modeling with multiple heat sources in ultra-thin chip stacking technology. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2017, vol. 7, iss.1, pp. 58–69.
9. Gupta S., Shukla D., Bharti A. Effect of alumina nanoparticles on shear strength of epoxy adhesive: experimental and finite element analysis. *International Conference on Advances in Mechanical, Industrial, Automation and Management Systems*, 2017, pp. 307–313.
10. Feodos'ev V.I. *Soprotivlenie materialov. Ucheb. dlya vuzov* [Strength of Materials]. Moscow, N.E. Bauman MSTU Publ., 2000. 592 p. (In Russian).
11. Anur'ev V.I. *Spravochnik konstruktora-mashinostroitel'ya v 3-h t. T.3. Pod red. I.I. Zhestkovej* [Reference Designer-Mechanical Engineer. Vol.3]. Moscow, Mashinostroenie, Publ., 2006, 928 c. (In Russian).

Submitted 30.06.2017; accepted 09.11.2017.

**Pogalov Anatoly I.** – Dr. Sci. (Eng.), Prof., head of the Engineering Mechanics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), dtm@miec.ru

**Blinov Gennady A.** – Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Microelectronics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1).

**Chugunov Eugene Y.** – PhD student of the Microelectronics Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), Chugunov-EU@inbox.ru